



Dipl.-Ing. Yuwu Sui
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/

Yuwu Sui studierte Hydro- und Ingenieur-geologie sowie Umweltgeologie an der Ozean Universität von China, in Qingdao (Provinz Shandong), wo er von 1998 bis 2003 als Umweltingenieur tätig war. Derzeit promoviert der Autor im Studiengang Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar.

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/

Thermisch-mechanische Behandlung Thermo-mechanical treatment

Untersuchung der Einflussgrößen der thermisch-mechanischen Behandlung für das Altbetonrecycling

Zusammenfassung: Das entwickelte Aufschlussverfahren soll der Qualitätsverbesserung von Betonrezyklaten für die erneute Betonherstellung dienen. Dazu werden eine thermische Behandlung und eine mechanische Behandlung miteinander kombiniert. Experimentell wurde nachgewiesen, dass bereits moderate Temperaturen um 300 °C ausreichen, um den Zementstein zu verspröden und ihn anschließend durch eine mechanische Behandlung zu entfernen. Als Produkte entstehen Gesteinskörnungen, die in ihren Eigenschaften natürlichen Zuschlägen nahe kommen, und ein zementsteinreiches Mehlkorn, das zu einem Bindemittel weiterverarbeitet werden kann.

Study of the factors influencing thermo-mechanical treatment for recycling used concrete

Summary: The liberation process developed is intended to improve the quality of concrete recyclates for the production of fresh concrete. For this end, thermal and mechanical treatment is combined. It was empirically proven that even moderate temperatures of around 300 °C are sufficient to make the hardened cement paste (HCP) brittle, so it can then be removed by means of mechanical treatment. The products of this process are aggregates with properties close to those of natural aggregates as well as a fine-grained material high in hardened cement paste that can be further processed to a binder.



Abbruch von Wohngebäuden in China • Demolition of buildings in China

1 Einleitung

Beton ist der meistverwendete Baustoff unserer Zeit. Weltweit werden jährlich ca. 8000 Mio. t Beton hergestellt [1], davon ca. 250 Mio. t in Deutschland [2] und ca. 3000 Mio. t in China [1]. Gleichzeitig entstehen große Mengen von Betonbruch. Die Prognose für Deutschland, die von den hergestellten Betonmengen und Annahmen für die Lebensdauer von Betonbauwerken ausgeht, weist aus, dass bis 2020 ca. 100 Mio. t Betonabbruch entstehen kann [3]. Die in China zu erwartenden Mengen an Betonbruch bewegen sich zwischen 200 und 1040 Mio. t/a [4]. Sie liegen, ähnlich wie auch die produzierten Betonmengen, um den Faktor 10 über den für Deutschland angegebenen Werten.

Gegenwärtig beschränkt sich die Wiederverwertung des aufbereiteten Betonschutts hauptsächlich auf die Bereiche Füllmaterial und Material für Trag- und Frostschutzschichten. Hochwertige Verwertung von Betonrezyklaten als Gesteinskörnung im Beton werden bisher nur in geringem Umfang genutzt, obwohl die Anforderungen und Einsatzbereiche durch Vorschriften klar definiert sind. Nach der Erhebung

1 Introduction

Concrete is the most commonly used building material in our time. Around 8000 mill. t concrete are produced annually worldwide [1], including around 250 mill. t in Germany [2] and around 3000 mill. t in China [1]. At the same time, large volumes of concrete rubble are produced. The forecast for Germany, which is based on the concrete volumes produced and assumptions regarding the lifetime of concrete structures, indicates that around 100 mill. t of concrete rubble could be produced by the year 2020 [3]. The volumes of concrete rubble expected in China range between 200 and 1040 million t/a [4]. They are in a similar range as the volumes of concrete produced, and about 10 times higher than the volumes specified for Germany.

At present, the recycling of the processed concrete rubble is mainly restricted to filler material and material for base and anti-freeze courses. High-quality recycling of concrete, with recycle being used as aggregate in fresh concrete, has so far only been realized to a limited extent, although the requirements and applications are clearly defined by relevant regula-

der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau wurden im Jahr 2004 von insgesamt 49,6 Mio. t produzierten RC-Baustoffen 4,9 % als Betonzuschlag eingesetzt [5].

2 Aktueller Stand der Behandlungsverfahren für den Aufschluss von Beton

Rezyklierte Gesteinskörnungen, die durch eine ein- oder mehrstufige Zerkleinerung in Prall- und/oder Backenbrechern aus Betonbruch hergestellt werden, sind Komposite aus Zementstein und den ursprünglichen Zuschlägen. Werden diese Komposite zur erneuten Betonherstellung eingesetzt, entsteht ein Beton, der neben den Gesteinskörnungen und dem sie verbindenden „neuen“ Zementstein noch „alten“ Zementstein enthält. Dies kann eine Verschlechterung besonders solcher Festbetoneigenschaften wie Elastizitätsmodul, Schwinden und Kriechen bewirken, die besonders stark vom Zementstein beeinflusst werden. Diese Wirkungskette wurde durch experimentelle Untersuchungen bestätigt [6]. Gleichzeitig ergibt sich daraus, dass die Auswirkungen rezyklierter Gesteinskörnungen auf die Betoneigenschaften unterschiedlich stark ausfallen können, je nach dem, wie viel Zementstein die Rezyklate aufweisen.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren beschrieben, die den Aufschluss von Beton, d. h. die Zerlegung des Betons in den ursprünglichen Zuschlag und den Zementstein zum Inhalt haben. Die Verfahren beruhen auf

- einer mechanischen Behandlung,
- einer thermisch-mechanischen Behandlung bzw.
- einer elektrodynamischen oder elektrohydraulischen Behandlung.

Die Verfahren, bei denen der Zementstein einer Körnung aus Altbetonbruch durch eine thermische Behandlung entfernt wird, wurden in Japan und in den Niederlanden entwickelt. In beiden Verfahren dient die thermische Behandlung der Entfestigung des Zementsteins. Bei dem japanischen Verfahren wird der Betonbruch mit auf 300 °C vorgewärmter Luft durchströmt. Angaben zu der Temperatur, die der Beton erreicht, werden nicht gemacht. Nach der thermischen Behandlung wird der Beton in Kugelmöhlen abrasiv beansprucht. Das Verfahren wird gegenwärtig bereits in einer Anlage mit einem Durchsatz von 5 t/h erprobt [7]. Bei dem niederländischen Verfahren erfolgt die Erwärmung des Betonbruchs in einem Drehrohrfurnen auf eine Temperatur von 700 °C. Es erfolgt keine zusätzliche Abrasionsbeanspruchung [8]. In den zitierten Arbeiten wurden also unterschiedliche Behandlungstemperaturen als erforderlich angesehen. Eine niedrigere Behandlungstemperatur kann nach diesen Beispielen durch eine mechanische Beanspruchung ausgeglichen werden.

3 Experimentelle Untersuchungen zur thermisch-mechanischen Behandlung für das Altbetonrecycling

3.1 Versuchsschwerpunkte, Ausgangsmaterial und Versuchsablauf

Das Verfahren der thermisch-mechanischen Behandlung für das Altbetonrecycling ist eine geeignete Methode, jedoch ist das Verfahren sehr komplex und energieaufwändig. Die

tionen. According to the survey conducted by the Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (a working group of the German trade and industry associations involved in the construction sector), only 4.9 % of a total of 49.6 million t of RC building materials produced in 2004 was used as concrete aggregate [5].

2 Current the treatment processes for the concrete liberation

Recycled aggregates produced by means of single- or multi-stage comminution in impact and/or jaw crushers from concrete rubble are composites of hardened cement paste (HCP) and the original aggregates. If these composites are reused for concrete production, a concrete is formed which contains “old” HCP in addition to the aggregate and the “new” HCP used to bond everything together. This can effect deterioration of the hard concrete properties, especially the modulus of elasticity, shrinkage and creep, which are influenced particularly strongly by the HCP. This chain of effect was confirmed in empirical studies [6]. At the same time, it follows that the effects of recycled aggregate on the concrete properties can vary depending on how much HCP the recycles contain.

In the literature various processes are described that are designed to liberate the concrete, i.e. break down the concrete into the original aggregate and HCP. These processes are based on

- mechanical treatment,
- thermo-mechanical treatment or
- electrodynamic or electrohydraulic treatment.

The processes in which the HCP is removed from used concrete rubble by means of thermal treatment were developed in Japan and the Netherlands. In both processes, the thermal treatment is applied to soften the HCP. In the Japanese process, air preheated to 300 °C flows through the concrete rubble. No specifications are given as regards the temperature reached by the concrete itself. After this thermal treatment, the concrete is subjected to abrasion stresses in ball mills. The process is currently under tests with a throughput of 5 t/h [7]. In the Dutch process, the concrete rubble is heated to a temperature of 700 °C in a rotary tube furnace. It is not subjected to any additional abrasive stress [8]. In the cited research, therefore, different treatment temperatures were regarded as necessary. According to these examples, it is possible to compensate for the lower treatment temperature with mechanical stress.

3 Empirical studies of thermo-mechanical treatment for used concrete recycling

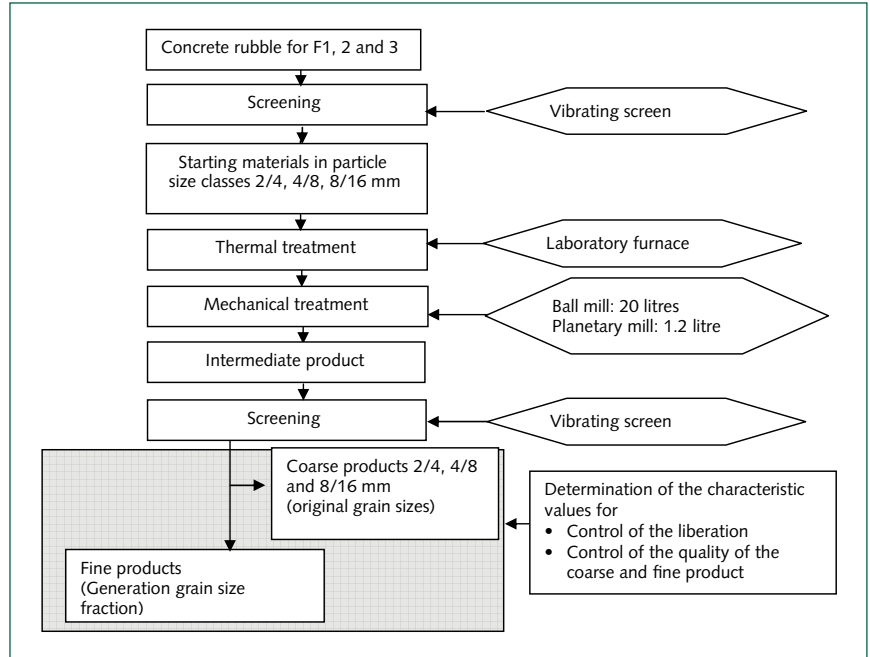
3.1 Test focuses, starting materials and test procedure

Thermo-mechanical treatment is an expedient method for recycling used concrete, but the process is very complex and energy-intensive. A reduction of the thermal treatment temperature and the use of simply designed equipment could contribute to improving the suitability of this method for field application.

Verminderung der thermischen Behandlungstemperatur und die Verwendung von einfach aufgebauten Geräten könnten zur Verbesserung der Praxistauglichkeit beitragen.

Die hier beschriebenen Untersuchungen der Einflussgrößen der thermischen und der mechanischen Behandlung für das Recycling von Altbeton umfassen die folgenden Schwerpunkte:

- Schwerpunkt 1: Aufschlussverhalten von Altbeton bei Variation der thermischen Behandlung und konstanter mechanischer Behandlung.
- Schwerpunkt 2: Aufschlussverhalten von Altbeton bei Variation der mechanischen Behandlung und konstanter thermischer Behandlung.
- Schwerpunkt 3: Wechselwirkung der thermischen und der mechanischen Behandlung auf das Aufschlussverhalten von Altbeton.



1 Darstellung der Durchführungen der Untersuchungen (SP: Schwerpunkt)
Flow sheet showing the test procedure (SP: Focus)

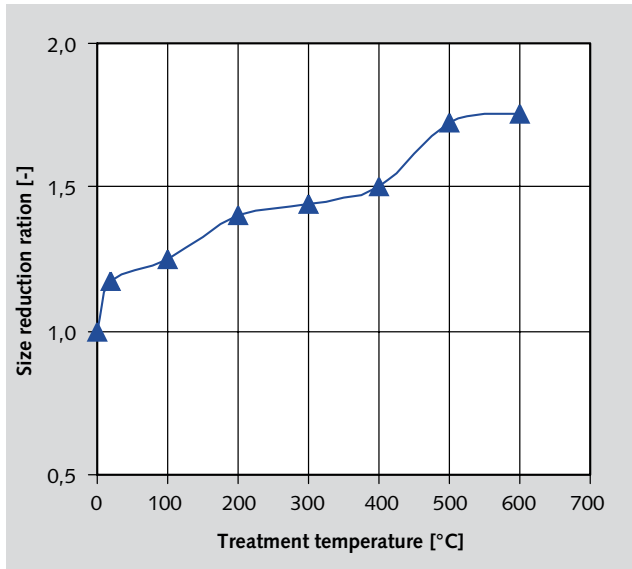
Für die Untersuchungen werden ausschließlich Laborbetone verwendet. Teilweise lagen die Betone bereits in zerkleinerter Form als Betonbruch vor, z.T. mussten die Betonwürfel zunächst mittels Laborbackenbrecher aufbereitet werden. Für die Schwerpunkte 1 und 3 lagen Gemische von Laborbetonen in den Festigkeitsklassen B25, B35 und B45 vor. Als

Studies of the factors influencing thermal and mechanical treatment for recycling used concrete were focussed as follows:

- Focus 1: Liberation behaviour of used concrete on variation of the thermal treatment with constant mechanical treatment.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Kennwerte zur Beurteilung des Verfahrens
Table 1: Summary of the characteristic values for evaluation of the process

Nachzuweisende Effekte und Kennwerte / Effects to be proven and characteristic values	Gleichungen / Equations	Erklärung der typischen Fälle / Explanation of the typical cases
Masseausbringen an Grobgut a_G und an Feingut a_F / Mass yield of coarse material a_G and fines a_F (m_A : Masse des Ausgangsmaterials in kg; m_G : Masse des Grobguts in kg; m_F : Masse des Feinguts in kg / m_A : mass of the starting material in kg; m_G : mass of the coarse material in kg; m_F : mass of the fine material in kg)	$a_G = \frac{m_G}{m_A}$ $a_F = \frac{m_F}{m_A}$ $a_G + a_F = 1$	$a_G = 0, a_F = 1$: Das Aufgabematerial ist vollständig zu Feingut aufbereitet worden. Je stärker die Zerkleinerung bei der thermischen bzw. der thermisch-mechanischen Behandlung, desto kleiner ist a_G / The feed material has been completely processed to fine material. The stronger the comminution with the thermal or the thermo-mechanical treatment, the smaller is a_G
Zerkleinerungsverhältnis R_m / Size reduction ratio R_m : Verhältnis der gewichteten, mittleren Korngröße von Ausgangsmaterial und Produkte / Ratio of the weighted mean grain size of starting material and products	$R_m = \frac{\chi_{m,A}}{\chi_{m,P}}$	$R_m = 1$ für das Grobgut / $R_m = 1$ for the coarse material: Es hat keine Zerkleinerung stattgefunden. Je stärker die Zerkleinerung bei der thermischen bzw. der thermisch-mechanischen Behandlung, desto größer das Verhältnis R_m / No comminution has taken place. The stronger the comminution with the thermal or the thermo-mechanical treatment, the larger the R_m ratio
Verbleib des Zementsteins im Grobgut V_G und Anreicherung des Zementsteins im Feingut V_F / Residual content of hardened cement paste in the coarse material V_G and concentration of the hardened cement paste in the fines V_F ($Z_{S,A}$: Masse des Zementsteins im Ausgangsmaterial in kg; $Z_{S,G}$: Masse des Zementsteins im Grobgut in kg; $Z_{S,F}$: Masse des Zementsteins im Feingut in kg / $Z_{S,A}$: mass of the hardened cement paste in the starting material in kg; $Z_{S,G}$: mass of the hardened cement paste in the coarse material in kg; $Z_{S,F}$: mass of the hardened cement paste in the fine material in kg)	$V_G = \frac{Z_{S,G}}{Z_{S,A}} \cdot \alpha_G$ $V_F = \frac{Z_{S,F}}{Z_{S,A}} \cdot \alpha_F$	$V_G = 0$ wegen $Z_G = 0$ / $V_G = 0$ on account of $Z_G = 0$: Es verbleibt kein Zementstein im Grobgut. Je stärker die Anreicherung bei der thermischen bzw. der thermisch-mechanischen Behandlung, desto kleiner ist V_G / No hardened cement paste remains in the coarse material. The stronger the concentration during thermal or thermo-mechanical treatment, the smaller V_G is



2 Ausgangsmaterial 8/16 mm – Einfluss der Temperatur der thermischen Behandlung auf das Zerkleinerungsverhältnis
Starting material 8/16 mm – influence of the temperature of the thermal treatment on the size reduction ratio

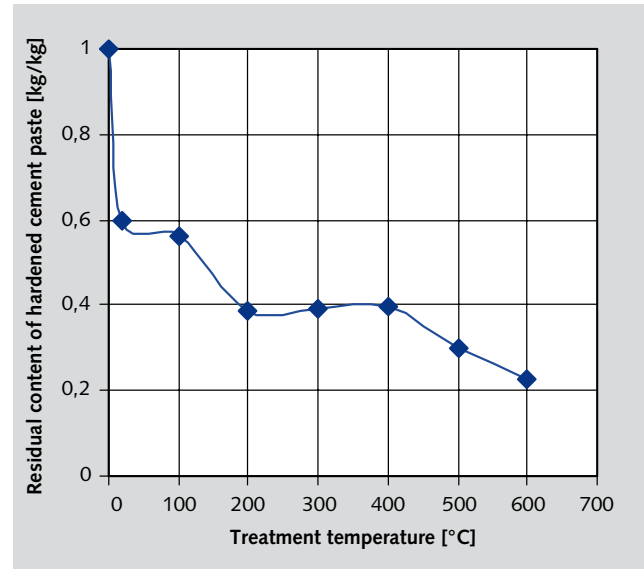
Gesteinskörnungen enthielten sie Sande und Kiese bzw. Sande und Splitte (8/16 mm). Der Modellbeton für den Schwerpunkt 2 entspricht der Festigkeitsklasse B45 und enthält Sand und Kies (16/32 mm) als Zuschlag.

Der Versuchsablauf ist in **Bild 1** dargestellt. Die gebrochenen Altbetone wurden zunächst durch Vibrationssiebung in die Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/16 mm zerlegt. Die erzeugten Fraktionen wurden anschließend in einem Laborofen bei zwischen 100 und 600 °C variierten Temperaturen für jeweils 30 min behandelt. Die mechanische Behandlung erfolgte in Abhängigkeit von der zu behandelnden Menge in einer Kugelmühle oder in einer Laborplanetenmühle. Bei der Untersuchung im Schwerpunkt 1 wurde eine konstante Mahldauer von 3 min gehalten. Im Schwerpunkt 2 erfolgte die Temperaturbehandlung bei 500 °C, die Mahldauer wurde variiert. Nach der Behandlung wurde das Zwischenprodukt mittels Vibrationssiebung in die ursprüngliche Kornklasse und die entstandenen Feinprodukte fraktioniert.

Die Beurteilung der in den Untersuchungen erzielten Effekte umfasst zwei Teile:

1. Verfahrenstechnische Kennwerte für die Beurteilung der Zerkleinerung des Ausgangsmaterials – Massenausbringen, Zerkleinerungsverhältnis und Verbleib des Zementsteins im Grobprodukt.
2. Kennwerte für die Beurteilung der Qualität der erzeugten Produkte – Rohdichte, Zementsteingehalt usw.

In den **Tabellen 1** und **2** sind die Definitionen der verwendeten Kennwerte zusammengefasst.



3 Ausgangsmaterial 8/16 mm – Einfluss der Temperatur der thermischen Behandlung auf den Verbleib des Zementsteins im Grobprodukt
Starting material 8/16 mm – influence of the temperature of the thermal treatment on the residual content of hardened cement paste in the coarse product

- Focus 2: Liberation behaviour of used concrete on variation of the mechanical treatment with constant thermal treatment.
- Focus 3: Interaction and combined effect of thermal and mechanical treatment on the liberation behaviour of used concrete.

For the studies, only laboratory concretes are used. Some of the concretes were already available in comminuted form as concrete rubble, in some cases concrete cubes first had to be prepared in laboratory jaw crushers. For Focuses 1 and 3 mixed laboratory concretes in the strength classes B25, B35 and B45 were available. They contained sands and gravel and sands and chippings (8/16 mm) respectively as aggregate. The model concrete for Focus 2 corresponds to the strength class B45 and contains sand and gravel (16/32 mm) as aggregate.

The test procedure is shown in **Fig. 1**. The crushed used concretes were first sized into the fractions 2/4, 4/8 and 8/16 mm on a vibrating screen. The resulting fractions were then treated in a laboratory furnace at temperatures varied between 100 and 600 °C for 30 min in each case. Mechanical treatment was performed in a ball mill or a laboratory-scale planetary mill depending on the volume to be treated. For the Focus 1 study a constant milling time of 3 min was maintained. For Focus 2, thermal treatment was performed at 500 °C while the milling time was varied. After treatment, the intermediate product was sized into the original size range and resulting fines on a vibrating screen.

Evaluation of the effects achieved in the tests comprises two parts:

3.2 Wesentliche Ergebnisse

Die Temperatur der thermischen Behandlung hat wesentlichen Einfluss auf das erzielte Ergebnis – mit Erhöhung der Temperatur steigt der Zerkleinerungsgrad an. Das Zerkleinerungsverhältnis für das Ausgangsmaterial 8/16 mm beträgt 1,18, wenn das Material ohne thermische Behandlung einer 3-minütigen mechanischen Behandlung in der Planetenmühle unterzogen wird. Es steigt auf 1,76, wenn das Material einer thermischen Behandlung bei 600 °C unterworfen wurde, bevor die Mahlung erfolgte (Bild 2). Parallel zur durch die Temperierung intensivierten Zerkleinerung nimmt der Verbleib des Zementsteins im Grobprodukt 8/16 mm ab (Bild 3).

Die Wirkung der thermischen Behandlung wird von der Korngröße des Ausgangsmaterials beeinflusst. Bei konstanter mechanischer Behandlung konnte für das grobe Ausgangsmaterial eine stärkere Zunahme des Zerkleinerungsverhältnisses mit steigender Behandlungstemperatur ermittelt werden. Je höher die Behandlungstemperatur ist, desto stärker ist die Zerkleinerung. Für das feine Ausgangsmaterial ergibt sich bereits ohne thermische Behandlung eine starke Zerkleinerung durch die mechanische Behandlung, die bei Temperatursteigerung nicht weiter voranschreitet, sondern nahezu konstant bleibt (Bild 4).

1. Process values for assessing comminution of the starting material – mass yield, size reduction ratio and residual content of the HCP in the coarse product.
2. Characteristic values for evaluation of the quality of the products – density, HCP content, etc.

In Tables 1 and 2 definitions of the characteristic values used are summarized.

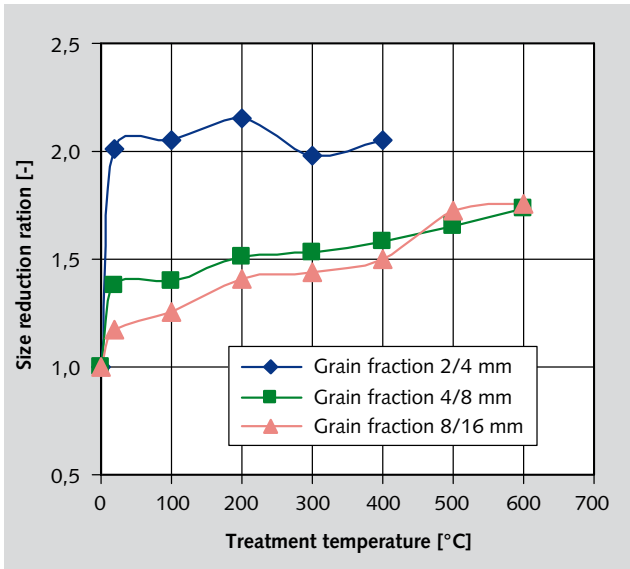
3.2 Key results

The temperature of the thermal treatment has a key influence on the result achieved – with a higher temperature, size reduction also increases. The size reduction ratio for the 8/16-mm starting material is 1.18, when the material is subjected to 3-minute mechanical treatment in the planetary mill without thermal treatment. It increases to 1.76 when the material is subjected to thermal treatment at 600 °C prior to milling (Fig. 2). Parallel to the comminution being intensified by tempering, the residual content of the hardened cement paste in the 8/16-mm coarse product decreases (Fig. 3).

The effect of the thermal treatment is influenced by the particle size of the starting material. With constant mechanical treatment, for the coarse starting material, a stronger

Tabelle 2: Zusammenfassung der Kennwerte zur Beurteilung der Produkte
Table 2: Summary of the characteristic values for evaluation of the products

Nachzuweisende Effekte und Kennwerte / Effects to be proven and characteristic values	Gleichungen / Equations	Erklärung der typischen Fälle / Explanation of the typical cases
<p>Zementsteingehalt und Zuschlaggehalt des Grobgutes $Z_{S,G}$, $Z_{A,G}$ / HCP content and aggregate content of the coarse material $Z_{S,G}$, $Z_{A,G}$</p> <p>Zementsteingehalt und Zuschlaggehalt des Feingutes $Z_{S,F}$, $Z_{A,F}$ / HCP content and aggregate of the fine material $Z_{S,F}$, $Z_{A,F}$</p> <p>($Z_{S,A}$: Zementsteingehalt des Ausgangsmaterials / $Z_{S,A}$: Hardened cement paste content of the starting material)</p>	$Z_{S,G} + Z_{A,G} = 1$ $Z_{S,F} + Z_{A,F} = 1$	<p>Idealfall / Ideal case: $Z_{S,G} = 0$ Grobe Produkte ohne Zementsteinanhaftungen / Coarse products without HCP particles sticking to it</p> <p>Teilweise Trennung / Partial separation: $0 < Z_{S,G} < Z_{S,A}$ Grobe Produkte mit Zementsteinanhaftung / Coarse products with HCP particles sticking to them</p> <p>Keine Trennung / No separation: $Z_{S,G} = Z_{S,A}$ Zementsteingehalt der groben Produkte gegenüber Ausgangsmaterial unverändert / HCP content of the coarse products unchanged compared to the starting material</p>
<p>Rein- und Rohdichte des Grobgutes $\rho_{\text{Rein,G}}$, $\rho_{\text{Roh,G}}$ / Theoretical and apparent density of the coarse material $\rho_{\text{Theoretical,G}}$, $\rho_{\text{Apparent,G}}$</p> <p>($\rho_{\text{Rein,GK}}$ und $\rho_{\text{Roh,GK}}$: Rein- und Rohdichte der Gesteinskörnung; $\rho_{\text{Rein,A}}$, $\rho_{\text{Roh,A}}$: Rein- und Rohdichte des Ausgangsmaterials / $\rho_{\text{Theoretical,GK}}$ und $\rho_{\text{Apparent,GK}}$: theoretical and apparent density of the aggregates; $\rho_{\text{Theoretical,A}}$, $\rho_{\text{Apparent,A}}$: theoretical and apparent density of the starting material)</p>	$\rho_{\text{Theoretical,G}} = \frac{m}{V_{\text{pore-free}}}$ $\rho_{\text{Apparent,G}} = \frac{m}{V_{\text{porous}}}$	<p>Idealfall / Ideal case: $\rho_{\text{Rein,G}} = \rho_{\text{Rein,GK}}$ / $\rho_{\text{Theoretical,G}} = \rho_{\text{Theoretical,GK}}$ $\rho_{\text{Roh,G}} = \rho_{\text{Roh,GK}}$ / $\rho_{\text{Apparent,G}} = \rho_{\text{Apparent,GK}}$ Grobe Produkte ohne Zementstein, sehr gute Qualität / Coarse products without HCP, very good quality</p> <p>Keine Trennung / No separation: $\rho_{\text{Rein,G}} = \rho_{\text{Rein,A}}$ / $\rho_{\text{Theoretical,G}} = \rho_{\text{Theoretical,A}}$ $\rho_{\text{Roh,G}} = \rho_{\text{Roh,A}}$ / $\rho_{\text{Apparent,G}} = \rho_{\text{Apparent,A}}$</p>
<p>Rein- und Rohdichte des Feingutes $\rho_{\text{Rein,F}}$, $\rho_{\text{Roh,F}}$ / Theoretical and apparent density of the fine mate- rial $\rho_{\text{Theoretical,F}}$, $\rho_{\text{Apparent,F}}$</p> <p>($\rho_{\text{Rein,ZS}}$, $\rho_{\text{Roh,ZS}}$: Rein- und Rohdichte des Zementsteins / $\rho_{\text{Theoretical,ZS}}$, $\rho_{\text{Apparent,ZS}}$: theoretical and apparent density of the HCP)</p>	$\rho_{\text{Theoretical,F}} = \frac{m}{V_{\text{pore-free}}}$ $\rho_{\text{Apparent,F}} = \frac{m}{V_{\text{porous}}}$	<p>Idealfall / Ideal case: $\rho_{\text{Rein,F}} = \rho_{\text{Rein,ZS}}$ / $\rho_{\text{Theoretical,F}} = \rho_{\text{Theoretical,ZS}}$ $\rho_{\text{Roh,F}} = \rho_{\text{Roh,ZS}}$ / $\rho_{\text{Apparent,F}} = \rho_{\text{Apparent,ZS}}$ Feine Produkte 0/0,125 mm ohne Zuschlag, sehr gute Qualität / Fine products 0/0.125 mm without aggregate, very good quality</p> <p>Keine Trennung / No separation: $\rho_{\text{Rein,F}} = \rho_{\text{Rein,A}}$ / $\rho_{\text{Theoretical,F}} = \rho_{\text{Theoretical,A}}$ $\rho_{\text{Roh,F}} = \rho_{\text{Roh,A}}$ / $\rho_{\text{Apparent,F}} = \rho_{\text{Apparent,A}}$</p>

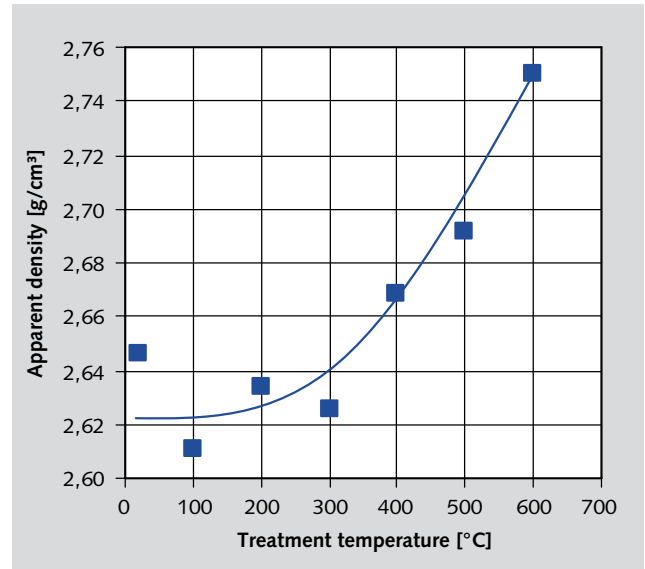


4 Einfluss der Korngröße des Ausgangsmaterials auf den Zerkleinerungsgrad bei der thermischen Behandlung

Influence of the particle size of the starting material on the size reduction ratio during thermal treatment

Die Qualität der Grobprodukte der Ausgangsfractionen wird durch die thermische Behandlung verbessert. Die Rohdichte eines Grobprodukts 8/16 mm wird nach der thermischen Behandlung von 20–600 °C um 4,2 % gesteigert (Bild 5). Der Zementstein, der durch die thermisch-mechanische Behandlung aus dem Grobgut entfernt wird, reichert sich in der Fraktion 0/0,125 mm des Feinguts an. In den Experimenten konnten maximale Zementsteingehalte über 60 % erreicht werden (Bild 6).

Die Dauer der mechanischen Behandlung beeinflusst den Aufschluss der Betonkörnung ebenfalls. Die Zerkleinerung des bei 500 °C thermisch behandelten Ausgangsmaterials

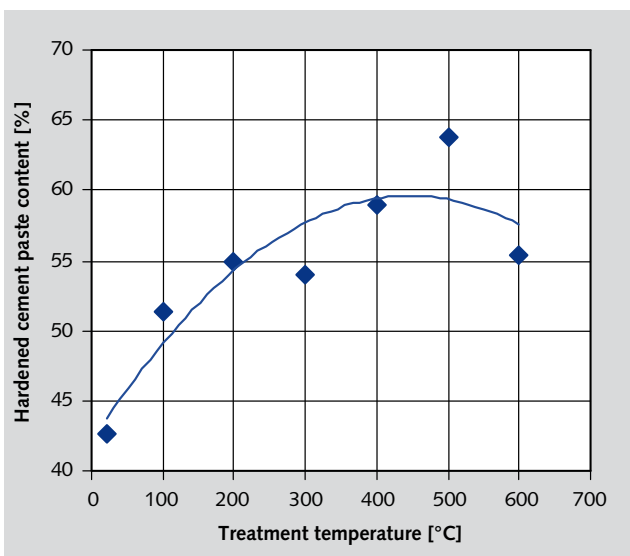


5 Einfluss der Temperatur der thermischen Behandlung auf die Rohdichte der Grobprodukte

Influence of the temperature of the thermal treatment on the apparent density of the coarse products

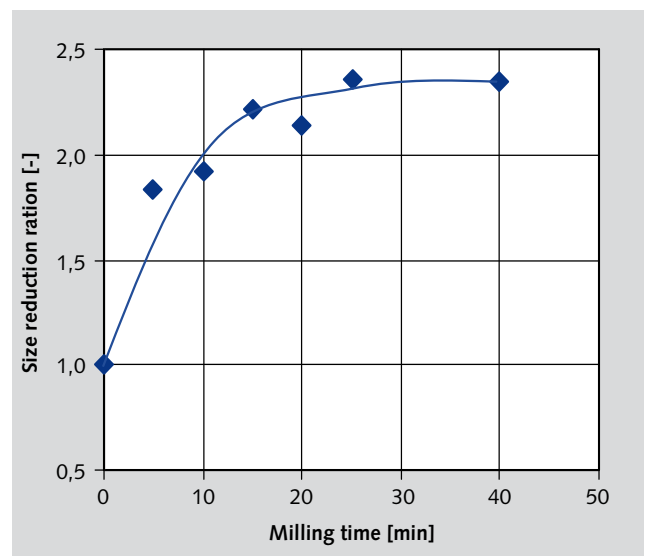
increase of the size reduction ratio could be determined with increasing treatment temperature. The higher the treatment temperature is, the more effective is the comminution. For the fine starting material, even without thermal treatment, a effective comminution is achieved with the mechanical treatment, which does not progress further with temperature increase, but remains almost constant (Fig. 4).

The quality of the coarse products of the starting fractions is improved by thermal treatment. The apparent density of a 8/16-mm coarse product is increased by 4.2 % after thermal treatment at 20–600 °C (Fig. 5). The HCP removed from the coarse material by means of thermo-mechanical treatment is



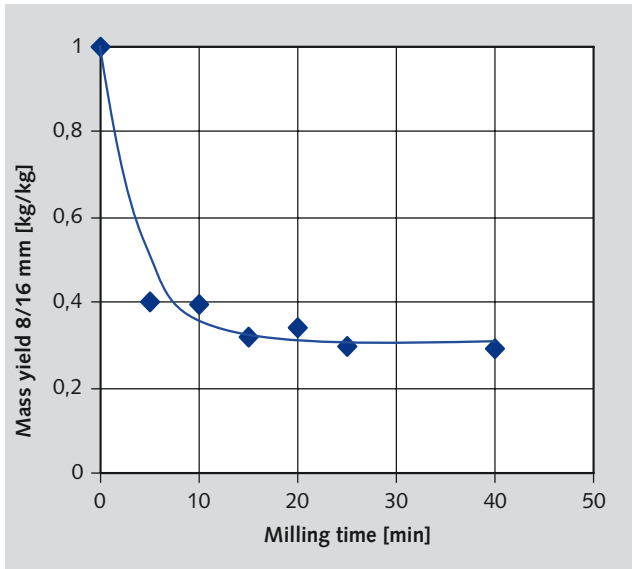
6 Einfluss der Temperatur der thermischen Behandlung auf den Zementsteingehalt in den feinen Produkten

Influence of the temperature of the thermal treatment on the hardened cement paste content in the fine products



7 Einfluss der Mahldauer auf das Zerkleinerungsverhältnis der Grobprodukte

Influence of the milling time on the size reduction ratio of the coarse products



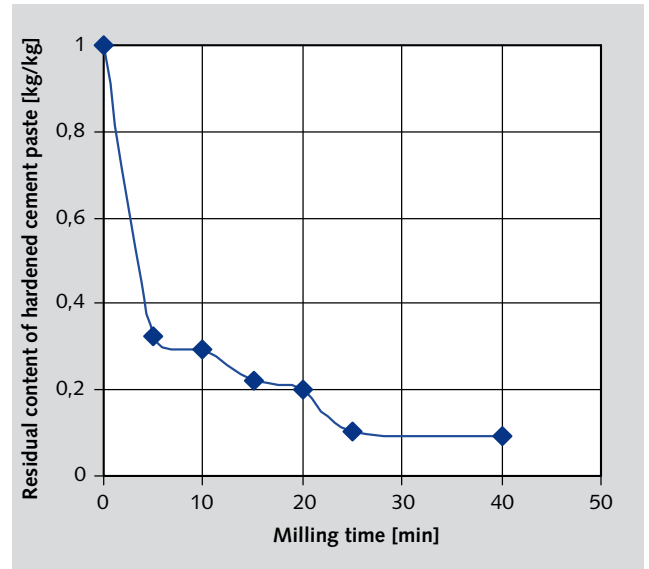
8 Einfluss der Mahldauer auf das Masseausbringen der Grobprodukte

Influence of the milling time on the mass yield of the coarse products

nimmt mit der Verlängerung der Mahldauer von 5–40 min zu (Bild 7). Bei 25–40 min erreicht das Masseausbringen der Grobprodukte 8/16 mm einen Wert von ca. 0,3 kg/kg und bleibt bei weiter Steigung der Mahldauer bis 40 min konstant (Bild 8).

Die Zementsteinminderung im Grobgut steigt mit der Mahldauer bis zu 25 min deutlich an. Über 25 min ist der Anstieg nur noch gering (Bild 9). Die Rohdichten der Grobprodukte 8/16 mm steigen mit der Mahldauer an (Bild 10). Der Zementstein kann mit der Verlängerung der Mahldauer zunehmend von der Gesteinskörnung getrennt werden.

Neben der Mahldauer können auch andere Mahlparameter das Altbetonrecycling durch thermisch-mechanische Behandlung beeinflussen. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 3 dargestellt.



9 Einfluss der Mahldauer auf den Zementsteinverbleib der Grobprodukte

Influence of the milling time on the residual content of the hardened cement paste in the coarse products

concentrated in the 0/0.125-mm fraction of the fine material. In the experiments, maximum HCP contents above 60 % could be achieved (Fig. 6).

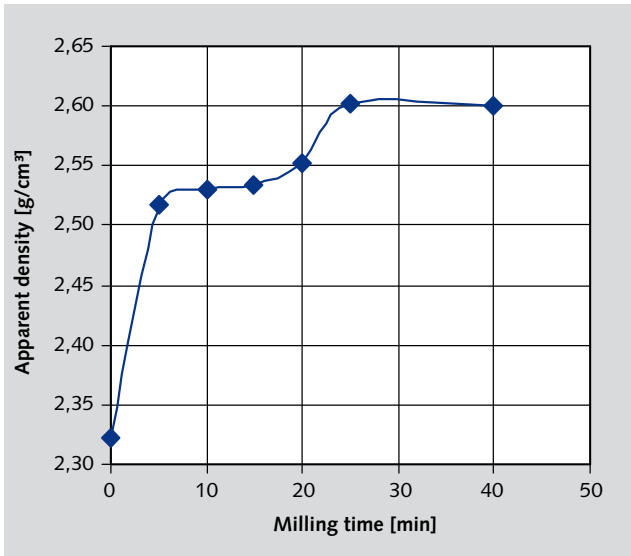
The duration of the mechanical treatment also influences the liberation of the concrete aggregate. Comminution of the starting material thermally treated at 500 °C increases with the lengthening of the milling time from 5–40 min (Fig. 7). At 25–40 min, the mass yield of the 8/16-mm coarse product reaches a value of around 0.3 kg/kg and remains constant with a further increase of the milling time to 40 min (Fig. 8).

Reduction of the HCP in the coarse material increases considerably with the milling time up to 25 min. Above 25 min, the increase is only slight (Fig. 9). The apparent densities of the 8/16-mm coarse products increase with the milling time (Fig. 10). The HCP can be increasingly separated from the aggregate with longer milling time.

Tabelle 3: Einflüsse der Mahlparameter auf das Altbetonrecycling durch thermisch-mechanische Behandlung

Table 3: Influence of the milling parameters on recycling of the used concrete with thermo-mechanical treatment

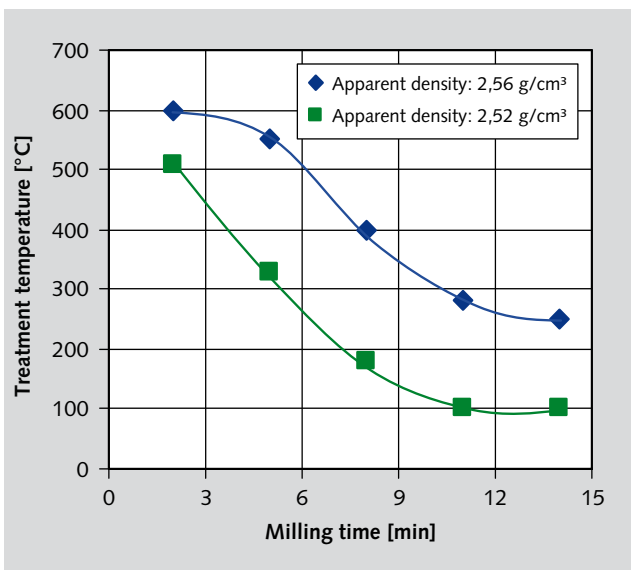
Mahlparameter / Milling parameter	Einfluss auf das Altbetonrecycling / Influence on recycling of the used concrete
Drehzahl / Speed	Anstieg des Zerkleinerungsgrads und deutliche Verbesserung der Qualität des Grobprodukts mit Zunahme der Drehzahl / Increase in the size reduction ratio and considerable improvement of the quality of the coarse product with increase in speed
Mahlgutfüllungsgrad / Mill feed filling	Geringer Einfluss / Low influence
Mahlkörperfüllungsgrad / Grinding media filling	Höherer Mahlkörperfüllungsgrad günstiger für das Altbetonrecycling in dem untersuchten Bereich von 0,21 bis 0,30 / Higher grinding media filling is more favourable for used concrete recycling in the tested range from 0.21 to 0.30
Mahlkörpergröße / Grinding media size	Anstieg des Zerkleinerungsgrads und Verbesserung der Qualität des Grobprodukts mit Zunahme der Kugelgröße. Nachteilige Auswirkungen für die Zerkleinerung des feinen Ausgangsmaterials / Increase in the size reduction ratio and improvement of the quality of the coarse product with increase in the grinding ball size. Adverse effects for the comminution of the fine starting material
Mahlkörperdichte / Grinding media density	Hohe Mahlkörperdichte bewirkt Qualitätsverbesserungen des Grobprodukts analog zum Einfluss der Mahlkörpergröße / High grinding media density effects the improvement of the quality of the coarse product like the influence of the grinding media size



10 Einfluss der Mahldauer auf die Rohdichte der Grobprodukte

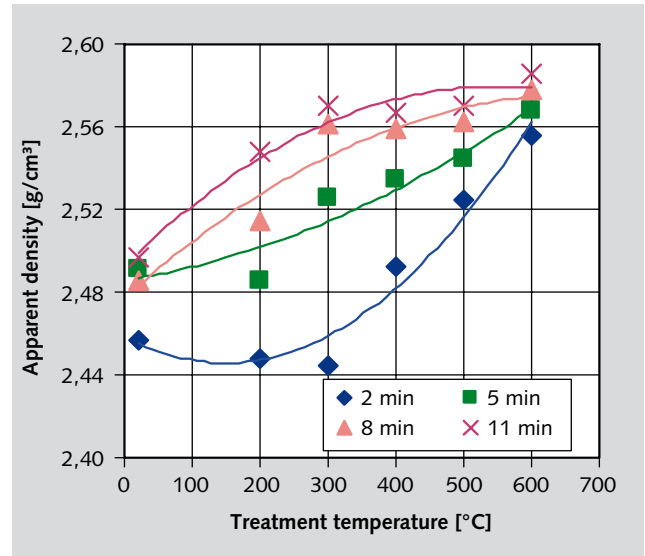
Influence of the milling time on the apparent density of the coarse products

Die Behandlungstemperatur und die Mahldauer beeinflussen sich gegenseitig bezüglich der Zerkleinerung des Ausgangsmaterials und der Verbesserung der Qualität der groben Produkte bei der thermisch-mechanischen Behandlung. In dem geeigneten Temperaturbereich kann die Qualität des Ausgangsmaterials durch die Variation von Behandlungstemperatur und Mahldauer gezielt eingestellt werden. Die Rohdichte der Produkte 4/8 mm hängt bei geringer Mahldauer (2 min, 5 min) stark von der Behandlungstemperatur ab. Erst bei hohen Behandlungstemperaturen werden die gewünschten hohen Rohdichten erreicht. Dagegen ist bei höheren Mahldauern (8 min, 11 min) der Anstieg der Roh-



12 Ausgangsmaterial 4/8 – Kombination der Mahldauer und der Temperatur für die Erzeugung der groben Produkte

Starting material 4/8 – combination of the milling time and the temperature for the production of the coarse products



11 Ausgangsmaterial 4/8 – Einflüsse der Behandlungstemperatur und der Mahldauer auf die Rohdichte des groben Produkts

Starting material 4/8 – influences of the treatment temperature and the milling time on the apparent density of the coarse product

Besides the milling time, other milling parameters can also influence used concrete recycling based on thermo-mechanical treatment. A summary is shown in Table 3.

The treatment temperature and milling time mutually influence each other with regard to the comminution of the starting material and improvement of the quality of the coarse products with thermomechanical treatment. In the appropriate temperature range, the quality of the starting material can be selectively adjusted by varying the treatment temperature and milling time. The apparent density of the 4/8-mm product depends, with a short milling time (2 min, 5 min), to a large extent on the treatment temperature. Only at high treatment temperatures are the required apparent densities achieved. On the other hand, with longer milling times (8 min, 11 min), the increase in the apparent density is lower with increasing temperature. Already at treatment temperatures of around 300 °C, apparent densities are achieved that are close to the apparent density of the starting material. With these milling times, temperature changes only have limited effect on the product quality (Fig. 11).

With the combination of milling time and temperature, a certain apparent density of the coarse products can be achieved. For example, the apparent density of 2.56 g/cm³ can be obtained with a temperature of 600 °C and a 2-minute milling time or also with a temperature of 280 °C and approx. 11 min milling (Fig. 12).

With regard to the HCP concentrated in the 0/0.125-mm fine grain, no complete balance between treatment temperature and milling time can be established, so with the combination 600 °C/2 min, a HCP content of 66.6 % results. It decreases to 58 % when thermal treatment is performed at 280 °C and the milling time is increased to 11 min. The reason is that with increased milling time, parallel to the HCP, the aggregate is comminuted too.

dichte mit zunehmender Temperatur geringer. Bereits bei Behandlungstemperaturen von ca. 300 °C werden Rohdichten erreicht, die nahe der Rohdichte des Ausgangsmaterials liegen. Temperaturänderungen wirken sich bei diesen Mahldauern wenig auf die Produktqualität aus (**Bild 11**).

Durch die Kombination von Mahldauer und Temperatur kann eine bestimmte Rohdichte der groben Produkte erreicht werden. Beispielsweise kann die Rohdichte von 2,56 g/cm³ bei einer Temperatur von 600 °C und einer 2-minütigen Mahldauer oder auch bei einer Temperatur von 280 °C und ca. 11 min Mahlung erzeugt werden (**Bild 12**).

In Bezug auf den Zementstein, der sich im Mehlkorn 0/0,125 mm anreichert, kann kein vollständiger Ausgleich zwischen Behandlungstemperatur und Mahldauer festgestellt werden, so ergibt sich bei der Kombination 600 °C/2 min ein Zementsteingehalt von 66,6 %. Er nimmt auf 58 % ab, wenn die thermische Behandlung bei 280 °C erfolgt und die Mahldauer auf 11 min erhöht wird. Ursache ist, dass bei erhöhter Mahldauer parallel zur Zementsteinzerkleinerung auch die Zuschläge zerkleinert werden.

4 Schlussbemerkung

Der Aufschluss von Beton ist erforderlich, wenn hochwertige zementsteinfreie Gesteinskörnungen erzeugt werden sollen, die einen Wiedereinsatz im Beton ohne Einschränkungen erlauben. Ein solcher Aufschluss kann mit einer Kombination aus einer thermischen Behandlung, der einer mechanischen Behandlung folgt, erreicht werden. Experimentell wurde nachgewiesen, dass bereits moderate Temperaturen um 300 °C ausreichen, um den Zementstein zu verspröden, so dass dieser dann durch eine mechanische Behandlung entfernt werden kann. Als Produkte entstehen Gesteinskörnungen, die in ihren Eigenschaften natürlichen Zuschlägen nahe kommen, sowie ein zementsteinreiches Mehlkorn.

4 Final remarks

The liberation of the concrete is necessary when high-quality hardened cement-paste-free aggregates are to be produced, which permit reuse in concrete without any restrictions. Such material liberation can be achieved with a combination of thermal treatment, followed by mechanical treatment. It was empirically proven that even moderate temperatures around 300 °C are sufficient to make the hardened cement paste brittle so that this can be removed by means of mechanical treatment. The products are aggregates with properties that come close to those of natural aggregates in addition to fine grain with a high content of hardened cement paste.

Literatur/Literature

- [1] Wu, Xuemei: Untersuchung zur Wiederverwendung der feinen Bauabfälle. Magisterarbeit, Universität Zhengzhou, Mai 2004
- [2] Rahlwes, K.: Recycling von Stahlbeton- und Stahlverbundkonstruktionen – Ansätze zu einer umweltökonomischen Bewertung. Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1991 in Berlin
- [3] Roos, Frank: Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1. Dissertation, Technische Universität München, 2002
- [4] Lin, Yanwen: Bauabfälle besetzen die Städte. China Jugend Tagblatt. 12.05.2010
- [5] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle, Erhebung 2004, Berlin, 28. Februar 2007
- [6] Weimann, Karin: Untersuchung zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinentechnik, Dissertation, 2008
- [7] Shima, Hirokazu et al.: An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 3 No. 1, 53-67, February 2005
- [8] Mulder, E.; Blaakeer, J.; Nijland, T.; Tamboer, L.: A Closed Material cycle for Concrete as a part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D waste. Proceedings of international conference "Challenges of concrete Construction": Sustainable concrete construction, Dundee (Scotland), 09.-11.09.2002, S. 555-562